

# 원전구조물의 고강도철근 설계 최적화 방안

## Design Optimization of Nuclear Power Plant Structures with High-Strength Reinforcements

이 병 수\*

Lee, Byung Soo

### Abstract

Generally, a lot of reinforcements are used in nuclear power plant concrete structures in order to improve the structural safety, but it may cause several potential problems due to the overcrowded reinforcement, such as the degradation of concrete quality, the construction delay and the increase of construction cost. In order to resolve these problems, structural test researches and code change studies on using high-strength reinforcement (Gr.80) in nuclear power plant structures are under way, and there is good progress in code change of ASM BPVC, III.2 and ACI 349. This purpose of this study is to review the code change status ASM BPVC, III.2, ACI 349 under way to use the high-strength reinforcement in nuclear power plant structures. Also I will introduce the design optimization of NPP structures with high-strength reinforcements in order to maximize the effect and minimize the problem when using the high-strength reinforcements in NPP structures.

키 워 드 : 원전구조물, 고강도 철근, 과밀철근, 설계 최적화

Keywords : Nuclear Power Plant Structures, High-Strength Reinforcement, overcrowded reinforcement, Design Optimization

## 1. 서 론

원전 콘크리트구조물은 구조적으로 안전해야 하는 관계로 최대직경 57mm 대구경 철근이 대량으로 사용되어 철근 과밀현상과 이에 따른 여러 문제점이 발생하고 있다. 철근과밀 배근에 따른 여러 문제점을 해결하고자 고강도 철근(Gr.80, 550Mpa)을 사용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 고강도 철근을 원전구조물에 사용할 수 있도록 설계기준(ASM BPVC, III.2, ACI 349) 코드개정 작업이 진행중에 있어 차기 개정판 반영을 기대하고 있으나 일부 제한사항이 존재할 것으로 예상하고 있다. 이러한 이유로 고강도철근의 적용효과를 극대화하고 시행착오를 최소화하기 위해서는 최적설계방안에 대한 충분한 검토가 필요하다.

## 2. 코드개정 추진 현황

### 2.1 ASM BPVC. III.2

원자력발전소의 콘크리트 격납구조물은 ASM BPVC, III.2 및 KEPIC SNB 기술기준에 따라 설계되고 시공되고 있으며, 현 기준에는 인장(Tension)과 전단(Shear) 철근 모두 일반강도(Gr.60, 420MPa 이하)만 사용할 수 있도록 규정되어 있다. 고강도철근 사용을 위해 구조성능 실험연구를 2011년에 착수하여 2014년 11년 개최된 2014 ASME Code Week에 기술기준 개정(안)을 발표하고 2015년 4월 기술기준 개정(안)을 설계분과 위원회 의제로 발의한 후 여러 차례 심의와 수정작업을 걸쳐 2016년 11월 설계분과 위원회를 통과하여 ASME Sec. III Div2 Committee에 제출되었다.

심의결과를 살펴보면, 인장(Tension)과 접선전단(Tangential Shear) 철근의 최대 설계기준 항복강도를 60,000 psi (420MPa)에서 80,000 psi (550MPa)로 상향조정하되, 방사전단(Radial Shear), 윤변전단(Peripheral Shear), 비틀림전단(Torsional Shear) 및 전단마찰(Shear Friction) 철근은 기존의 최대 설계기준 항복강도(60,000 psi)를 유지하기로 결정하였다.

### 2.2 ACI 349

원자력발전소의 안전성관련 콘크리트 구조물의 설계 및 시공에 적용되는 ACI 349 및 KEPIC SNC 설계기준에 따르면, 정착길이 계수 1.2를 적용하는 조건으로 휨(Flexure)철근에 한 해 고강도(Gr.80, 550MPa) 철근을 사용할 수 있도록 허용하고 있다. 전단벽체를 주요 구조부로 설계하는 원전 특성상 고강도철근의 사용이 불가한 상황이다. 고강도철근의 벽체구조물을 포함한 고강도 전단철근의 구조성능 실험연구를

\* 한국수력원자력(주), 중앙연구원 차장, 교신저자(lbs6985@khnp.co.kr)

2011년에 착수하여 2014년 10년 개최된 ACI 2014 Fall Convention 기간중 ACI 349 Committee에서 기술기준 개정(안)을 발표하고 2015년 4월 기술기준 개정(안)을 ACI 349 Main Committee 의제로 발의하였다. 이후 여러 차례 심의와 수정작업을 걸쳐 2016년 10월 코드개정 위원회를 통과하여 ACI Technical Activity Committee에 제출된 상태로 ACI 절차에 따라 차기판 반영을 기대하고 있다.

심의결과를 살펴보면, 휨/압축 부재의 주철근과 벽체부재의 전단(Shear) 철근의 최대 설계기준 항복강도를 80,000 psi (550MPa)로 사용할 수 있도록 개정하였으며, 기타부재의 전단(Shear), 비틀림(Torsion) 및 전단마찰(Shear Friction) 철근은 기존 기준에 따르기로 결정하였다.

### 3. 설계 최적화 방안

고강도 철근이 주요부재에 사용할 수 있도록 기술기준 개정이 추진되고 있으나, 벽체부재 이외의 전단철근의 경우에는 추가적인 실험연구 필요성이 제기되어 유보된 상황으로 고강도(Gr.80)와 일반강도(Gr.60) 철근의 혼용이 불가피하므로 이에 대한 대비가 필요하다. 또한, 고강도 철근이 사용된 주철근의 경우 정착길이와 이음길이가 항복강도 증가분과 고강도철근 정착길이 계수 1.2 적용분이 포함되어 일반강도 대비 60% 정도 늘어날 것으로 예상되므로 기계적이음 적용부위를 확대하고 확대머리철근의 적용방안 등을 검토하는 등 적용효과 극대화를 위한 설계 최적화 검토가 필요하다.

#### 3.1 고강도철근 적용가능 부위

휨/압축 부재의 주철근, 격납구조물의 접선전단(Tangential Shear)철근 및 벽체/슬래브의 면내 전단철근은 고강도(Gr.80) 철근을 적용할 수 있으나 나머지 부위는 기존과 마찬가지로 일반강도(Gr.60) 철근으로 설계하여야 한다.

#### 3.2 상이한 철근 항복강도의 혼용

일반강도(Gr.60) 철근의 제한요건이 상존하므로 항복강도가 상이한 일반강도(Gr.60)와 고강도(Gr.80) 철근을 혼용한 설계와 시공을 피할 수는 없다. 다만, 항복강도가 상이한 철근의 반입/가공/설치 과정에서 오작용 가능성이 상존하므로 이에 대한 대비가 필요하다. 이의 해결방안으로 아래와 같은 2가지 방법을 고려할 수 있다.

- 1) 고강도철근이 사용되는 주철근, 접선전단(Tangential Shear) 철근 및 면내 전단철근은 일정 직경(No9, 29mm) 이상의 대구경 철근으로 설계하고 일반강도 철근은 일정 직경(No8, 25mm) 이하의 소구경 철근으로 구분하여 설계하는 방안
- 2) 부위/부재별 Over Strength 등의 영향을 검토한 후 모든 부재를 고강도철근으로 사용하면서 일반강도가 사용된 부재 설계시 철근의 설계기준항복강도를 Gr.60 (420MPa)로 계산하는 방안

#### 3.3 설계(Design) 및 상세(Detail) 검토

고강도철근을 사용함에 따라 고려되어야 할 설계(Design) 및 상세(Detail)에 대한 충분한 검토와 논의가 필요하다.

- 1) 정착길이 산정방법 결정 : ACI 408R-03 정밀식 또는 1.2 계수를 적용한 ACI 318-14
- 2) 횡보강 철근과 측면피복 두께에 의한 횡구속 효과를 반영한 겹침이음 산정 방안
- 3) 기계적이음의 정착성능 품질확보 및 적용범위 확대 방안
- 4) 주철근의 국부좌굴(buckling) 저항능력 확보를 위한 횡보강 철근 간격 등 상세 개발
- 5) 인장지배(Tensile-Controlled) 단면의 변형률 제한 (Strain Limits) 방안
- 6) 고강도철근에 대한 콘크리트의 대응강도 (Compatible Strength) 범위 확정
- 7) 철근 수량과 철근 단면 최적화를 통한 최소철근비 (Minimum ratio of reinforcement) 요건 만족

### 4. 결 론

원전구조물에 고강도철근을 사용하기 위한 해외기술기준(ASM BPVC, III.2 및 ACI 349) 코드개정이 진행중에 있으며, 가시적인 성과가 이루어지고 있다. 고강도철근 적용효과를 극대화하고 시행착오를 최소화하기 위해서는 코드개정에 대비한 고강도철근 설계 최적화 방안에 대한 구체적이고 실체적인 연구가 필요하므로 이에 대한 추가연구를 진행할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

1. ASME BPVC, III.2-15 Code for Concrete Containments, 2015
2. ACI 349-13 Code Requirements for Nuclear Safety-Related Concrete Structures and Commentary, 2013